

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Бай Ю.Д., Разживин И.А., Гусев А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Распространение использования возобновляемых источников энергии в электроэнергетических системах набирает популярность во всем мире, в том числе в странах, обладающих большими запасами нефти и газа. Данный процесс вызван потребностью уменьшения негативного влияния невозобновляемых энергетических ресурсов, а также соответствующего регресса, ведущего к увеличению ущерба, наносимого окружающей среде. По оценкам Международного энергетического агентства, мощность возобновляемых источников энергии, построенных в Китае в 2016 году, составила 34 ГВт, а Австралию можно считать одним из лидеров использования фотоэлектрической солнечной энергии (превышает 3%). Следует отметить, что конечная мощность и стабильность выработки электроэнергии носят стохастический характер. В отличие от генераторов классического типа, параметры выдаваемой мощности ветроустановки жестко зависят от географических особенностей района установки, времени года, и т.д. [3]. Проникновение большого процента мощности ветротурбин приводит к изменению топологии и свойств энергосистем, что ведет к проблеме обеспечения статической и динамической устойчивости, особенно в случае больших возмущений.

Чтобы достоверно определить все возможные состояния системы, в которых она может находиться, необходимо в недетерминированной форме определить, как будут распределены значения напряжений и токов в узлах и ветвях. В связи с этим, в данной работе предполагается формирование стохастической модели ветра для дальнейшего изучения влияния возобновляемых источников энергии на устойчивость в недетерминированном виде.

Способность и точность прогнозирования ветровых характеристик ограничиваются качеством статистической информации и методами ее обработки. Например, в этих работах [7] для прогнозирования выработки электроэнергии использовались детерминированные методы, чтобы представить возобновляемые источники энергии как объект классической генерации. В статьях [8] используются методы оценки выходных параметров с частичным применением вероятностных характеристик исходных данных. Также, может применяться полная совокупность вероятностных характеристик (в том числе математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение), тестирование на пригодность с применением критериев согласия, расчет которых способствует достижению оптимальной мощности выработки возобновляемых источников энергии.

Поиск полных вероятностных характеристик исследуемой величины зависит от многих параметров, в том числе и от самой постановки вопроса, исходных данных. В случаях определения характеристик с учетом низкой их повторяемости (минимумы и максимумы), должно обеспечиваться достоверное совпадение экспериментальных замеров с теоретическими данными. Первоначально, аппроксимация скорости ветра широко использовалась для экстраполяции максимальных скоростей. Позднее, аппроксимация ветра законами Вейбулла и его производными стала одной из наиболее широко используемых. Он прост в использовании и точен для большинства ветровых условий, которые могут возникнуть в ходе исследований. Также, стоит упомянуть распределение Рэлея – это упрощенный вариант распределения Вейбулла, отличающийся своей простотой за счет использования только одного параметра, что отрицательно сказывается на качестве получаемых характеристик, и оно не так часто подходит. Гамма и логнормальные распределения также являются двухпараметрическими, они менее распространены в описаниях ветра, но могут гораздо лучше подходить для нескольких временных рядов ветра (в зависимости от повторяемости конкретных значений выборок ветра). Наряду с этими законами часто используется нормальное распределение, но для достоверной оценки параметров распределения требуется большой размер выборки. Существуют работы [4], в которых утверждается, что распределение вероятностей также хорошо описывается логнормальным распределением. Форма закона распределения также зависит от количества наблюдений. Возможные законы распределения для моделирования поведения ветра представлена в Таблице [5]:

Таблица

Статистические законы моделирования распределения ветра

Функция распределения	Плотность функции распределения
Распределение Вейбулла	$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k$
Нормальное распределение	$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(v - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$
Распределение Рэлея	$f(v) = \frac{2v}{c^2} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^2$
Гамма распределение	$f(v) = \frac{v^{\eta-1}}{\beta^\eta \Gamma(\eta)} \exp(-v / \beta)$
Логонормальное распределение	$f(v) = \frac{1}{v\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v) - \alpha}{\beta}\right)^2\right]$

Для точного определения возможного закона распределения ветра необходимо использовать несколько методов определения, подкреплённых критериями согласия Пирсона и Колмогорова – Смирнова. Предлагаются к использованию три метода [1]: графический, максимального правдоподобия, и моментов. Графический метод является самым простым в применении, однако точность оценки входных параметров может быть низкой. Метод правдоподобия, напротив, обладает хорошей точностью, но для ее достижения требуется использовать итерационные методы. Метод моментов приравнивает определенное число статистических моментов выборки к соответствующим моментам. Использование этих методов обычно подразумевает, что существует предположение о возможных вероятностных законах, которые имеются в ветровом временном ряду. Однако в случае рассмотрения неисследованных ветровых временных рядов логичнее использовать графический или полный перебор, если это допускается размерностью задачи.

Предполагаемое теоретическое распределение требует проверки на соответствие эмпирическому, полученному в ходе вычислений, и проверяется на пригодность критериями согласия. Самыми распространенными и зачастую достаточными можно считать критерии Пирсона [2] и Колмогорова-Смирнова [6]. Первый критерий сверяет разности в значениях на концах распределений, в то время как второй – проверяет центральные значения. Для целей работы уровень значимости критериев достаточно принять равным 5%.

Экспериментальная часть работы реализована в MATLAB. Для экспериментов использовались четыре образца временных рядов ветра с неизвестными заранее законами. Для всех входных данных была определена кумулятивная функция распределения, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. На основании полученной информации можно сделать предварительные выводы о повторяемости значений ветра, максимальных наблюдаемых и средних (средних) значениях. Далее, по кумулятивным данным с использованием методов определения законов распределения формируются возможные варианты подходящих вероятностных характеристик. Последним этапом происходит проверка на соответствие выбранным законам по критериям соответствия. Согласно расчетным данным, только для трех временных рядов удалось подобрать соответствующие законы, удовлетворяющие условиям проверки. Для оставшейся выборки в перечне распространенных двухпараметрических распределений требуемого закона не обнаружено.

Инструменты нахождения вероятностных характеристик ветровых временных рядов, представленные в данной статье, обширны, но не всегда достаточны для наиболее точного описания сложных законов. В некоторых случаях для получения надежных вероятностных параметров может потребоваться использование более сложных и продвинутых методов. Реализованные возможности моделирования распределения ветра позволяют в дальнейшем смоделировать плотность и функцию распределения вероятностей для ветротурбины различной конфигурации на основе данных конкретной территории. Дальнейшая работа будет направлена на использование полученных вероятностных характеристик для управления мощностью ветроэлектростанций в стохастическом формате.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4.*

#### Литература

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов [Текст]. М.: Высш. шк. – 1999. – 576 с.
2. Гафарова, Л.М. Об особенностях применения критерия согласия Пирсона  $\chi^2$  [Текст] / Л. М. Гафарова, И. Г. Завьялова, Н. Н. Мустафин // ЭСГИ. – 2015. – №4 (8). – С. 63-67.
3. Манусов, В. З. Моделирование законов распределений мощности ветроэнергетических и солнечных станций [Текст] / В. З. Манусов, Б. Ю. Лемешко, Ш. К. Халдаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 9. — С. 84-95.
4. Рыхлов, А. Б. Анализ применения различных законов распределения для выравнивания скоростей ветра на юго-востоке европейской территории России [Текст] / А. Б. Рыхлов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. – 2010. – Т. 10. – №. 2. – С. 25-30.
5. Akyuz, H., Gamgam, H. Statistical Analysis of Wind Speed Data with Weibull, Lognormal and Gamma Distributions [Text] / Akyuz, H., Gamgam, H. // Cumhuriyet Science Journal. – 2017. – Vol. 38. – Pp. 68-76.
6. Celik, H. A Statistical Approach to Estimate the Wind Speed Distribution: The Case of Gelibolu Region [Text] / Celik, H., Yilmaz, V. // Dogus Universitesi Dergisi. – 2008. – Vol. 9. – No. 1. – Pp. 122-132.
7. Karaki, S.H. Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar – Wind Energy Conversion Systems [Text] / Karaki, S.H., Chedid, R.B., Ramadan R. // IEEE Trans Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14. – No. 3. – Pp. 766–772.
8. Kruangpradit P., Tayati W., Hybrid Renewable Energy System Development in Thailand [Text] / Kruangpradit P., Tayati W. // Renewable Energy. – 1996. – Vol. 8. – No. 1-4. – Pp. 514–517.